

1/

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-352631

(43)Date of publication of application : 19.12.2000

(51)Int.Cl. G02B 6/12
G02B 1/02

(21)Application number : 11-162897 (71)Applicant : NEC CORP

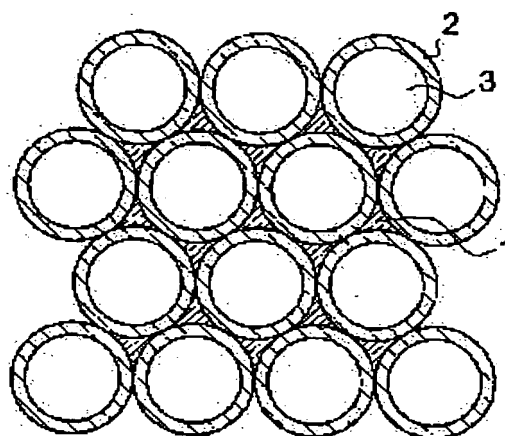
(22)Date of filing : 09.06.1999 (72)Inventor : TOKUSHIMA MASATOSHI

(54) PHOTONIC CRYSTAL AND ITS PRODUCTION

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a photonic crystal of a two-dimensional structure having perfect band gaps and high mechanical strength.

SOLUTION: The photonic crystal has a plurality of columnar bodies 1 which consist of first dielectric bodies arrayed to a two-dimensional honeycomb grid form, second dielectric bodies 2 which cover the columnar bodies 1 and are packed between the columnar bodies 1 and third dielectric bodies 3 which are included in the second dielectric bodies 2. The dielectric constant of the first dielectric bodies 1 is greater than the dielectric constant of the second dielectric bodies 2 and the dielectric constant of the third dielectric bodies 3.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 23.05.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japanese Patent Office

①

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2000-352631
(P2000-352631A)

(43)公開日 平成12年12月19日 (2000. 12. 19)

(51)Int.Cl.

G 0 2 B 6/12
1/02

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12
1/02

テ-マ-ト* (参考)

N 2 H 0 4 7

審査請求 有 請求項の数 7 O L (全 9 頁)

(21)出願番号 特願平11-162897

(22)出願日 平成11年6月9日 (1999. 6. 9)

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 徳島 正敏

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
式会社内

(74)代理人 100108578

弁理士 高橋 詔男 (外3名)

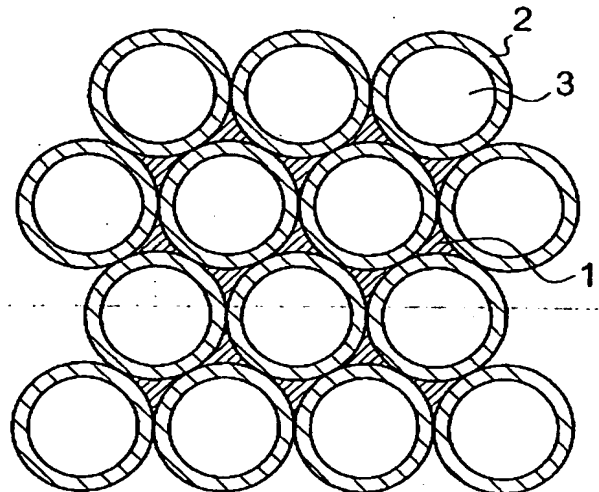
Fターム(参考) 2H047 KA02 PA01 PA05 PA24 QA02
QA04 TA00 TA43

(54)【発明の名称】 フォトニック結晶及びその製造方法

(57)【要約】

【課題】 完全バンドギャップを有し、かつ機械的強度の大きい2次元構造のフォトニック結晶を提供する。また、このフォトニック結晶を容易に、しかも量産し易い形で製造することができるフォトニック結晶の製造方法を提供する。

【解決手段】 2次元の蜂の巣格子状に配列された第1の誘電体からなる複数本の柱状体1と、柱状体1を被覆しかつ柱状体1間に充填された第2の誘電体2と、第2の誘電体2中に内包される第3の誘電体3とを備え、第1の誘電体1の誘電率は、第2の誘電体2の誘電率及び第3の誘電体3の誘電率よりも大であることを特徴とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 2次元の蜂の巣格子状に配列された第1の誘電体からなる複数本の柱状体と、柱状体を被覆しかつ該柱状体間に充填された第2の誘電体と、該第2の誘電体中に内包される第3の誘電体とを備え、前記第1の誘電体の誘電率は、前記第2の誘電体の誘電率及び前記第3の誘電体の誘電率よりも大であることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項2】 前記第1の誘電体はSiまたはGaAsであり、前記第2の誘電体はSiO₂、SiN_xまたはSiO_xN_yであることを特徴とする請求項1記載のフォトニック結晶。

【請求項3】 前記柱状体、前記第2の誘電体及び前記第3の誘電体を、均質媒質基板または多層構造基板に形成してなることを特徴とする請求項1または2記載のフォトニック結晶。

【請求項4】 第1の誘電体からなる柱状体が複数本、2次元の蜂の巣格子状に配列された基板上に、前記第1の誘電体より誘電率の小さい第2の誘電体からなる膜を成膜する工程を備え、この工程における前記膜の膜厚を、前記柱状体間で当該膜が連続する程度の膜厚とすることを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

【請求項5】 誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体の大きさを制御することを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

【請求項6】 三角格子状に配列された誘電体孔を形成した基板を酸化する工程を備え、生成する酸化膜の厚みを、少なくとも前記誘電体孔の隣接する孔間が完全に酸化膜に変化するだけの厚みとすることを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

【請求項7】 前記基板は、Si基板であることを特徴とする請求項4、5または6記載のフォトニック結晶の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、フォトニック結晶及びその製造方法に関し、特に、複数の誘電体柱を2次元の蜂の巣状に配列してなるフォトニック結晶及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、光伝送の分野において用いられる結晶に、均一媒質と異なり、光伝播に特異な波長分散特性を有するフォトニック結晶がある。このフォトニック結晶は、誘電率の大きく異なる2種類以上の誘電体を、光の波長程度の格子定数を有するように周期的に配列した複合誘電体結晶である。フォトニック結晶には、周期性を有する方向の数に応じて1次元、2次元、3次元の3種類の構造があり、それぞれの次元に対して具体的な構造が各種提案されている（例えば、固体物理 Vo

1.32 No. 11 p. 862 (1997) 参照）。

【0003】例えば、1次元のフォトニック結晶として、誘電体薄膜をその膜厚方向に一定間隔ずつ離して重ねた構造のものがある。このフォトニック結晶では、誘電体薄膜（誘電率 >1 ）と空気層（誘電率1）の2層を、その膜厚方向に交互に（周期的に）配列している。また、2次元のフォトニック結晶としては、誘電体基板に正方格子状や三角格子状に複数の縦孔を開孔したもの、あるいは逆に、誘電体基板上に正方格子状や三角格子状に複数の針（柱）を立設したものがある。

【0004】また、3次元のフォトニック結晶としては、誘電体基板に面心立方格子状に複数の斜めの孔を開孔したもの、あるいは逆に、誘電体基板に面心立方格子状に複数の針（柱）を立設したものがある。このフォトニック結晶は、誘電体基板に三角格子状に斜めの孔を開けることを互いに等角度に異なる方向から3回繰り返したり、あるいは等間隔で平行する棒を井桁状に積み上げていくなどの方法により実現することができる。

【0005】このように、フォトニック結晶は、誘電体配列の基本的な周期構造により三角格子、面心立方格子等、物質の結晶構造と同じ分類が成されている。このフォトニック結晶は、その製造方法が異なると具体的な構造も異なり、これらの構造の違いが光伝播特性に影響を及ぼす。フォトニック結晶の構造を適切に選べば、格子定数の $1/2$ 程度の波長の光が周期構造内のどの方向にも伝播することができない様にする事ができる。この時、その結晶はフォトニック・バンド・ギャップ(PBG)を有するという。

【0006】ここで、PBGを有する結晶の内部に周期性を乱す欠陥を導入すれば、この欠陥部分にのみ光が存在することができる。したがって、この結晶内に欠陥を閉じた領域として作製すれば光の共振器とすることができ、また、この結晶内に欠陥を線状に作製すれば導波路とすることができる。例えば、2次元フォトニック結晶の場合では、電界成分を周期構造の平面に平行になるTE波と、垂直になるTM波に分けることができる。一般的には、それぞれの光に対応するPBGの周波数 ω の範囲は必ずしも一致しないので、TE波とTM波の両方に対して同時にPBGが生じる周波数範囲が存在する場合、そのPBGは完全バンドギャップ（完全なPBG）と呼ばれることがある。

【0007】2次元で完全バンドギャップが存在する比較的単純な構造のフォトニック結晶に円形孔の三角格子配列がある。この場合、完全バンドギャップが得られる格子定数、孔径の目安は、例えば、誘電率11.4の誘電体基板に三角格子状に孔を配列した場合、図6に示すように、最も広い完全バンドギャップが得られるのは半径(r/a)が0.48、また周波数($\omega a/2\pi c$)が0.5程度のときである。但し、 r は孔の半径、 a は

フォトニック結晶の格子定数、 ω は光の角振動数、 c は真空中の光速である。

【0008】例えば、光ファイバーによる遠距離光通信に用いられる波長 $1.55\mu\text{m}$ の赤外線に対して必要な格子定数 a を計算すると、 $a=0.78\mu\text{m}$ となる。なお、この件に関しては、例えば、「フォトニック・クリスタル ザ・フロー・オブ・ライト」、pp. 125-126 (J.D.Joannopoulos, R.D.Meade and J.N.Winn, Photonic Crystals, Modeling the Flow of Light, Princeton University Press, pp.125-126) に詳しく記載されている。

【0009】しかしながら、従来の円形孔を三角格子配列とした2次元フォトニック結晶の場合においては、完全バンドギャップが得られるのは孔の直径 $d (=2r) = 0.95a$ のときであるから、孔間の壁の厚さは最小部で $0.05a$ 、即ち $0.035\mu\text{m}$ となり、現実問題として、作製するのが非常に困難であるという問題点があった。

【0010】そこで、例えば、前出の文献「フォトニック・クリスタル ザ・フロー・オブ・ライト」の125頁には、結晶構造として円柱状の誘電体を蜂の巣状に配列した2次元蜂の巣格子を用いた点が記載されている。この構造は、三角格子配列の構造に比べてやや複雑になるが、図7に示すように、 $(r/a) = 0.14$ 、 $(\omega a / 2\pi c) \sim 1.0$ のときに三角格子配列の構造と同等以上の広さの完全バンドギャップが存在し、かつ、波長 $1.55\mu\text{m}$ に対して格子定数 $a = 1.55\mu\text{m}$ 、円柱の直径 $d = 0.22\mu\text{m}$ 、最小円柱間距離 $0.46\mu\text{m}$ と、構造の最小寸法が大幅に緩和されているので、完全バンドギャップの生成と実際の結晶作製を両立させる場合において一応の効果を奏している。

【0011】

【発明が解決しようとする課題】ところで、従来の蜂の巣格子2次元フォトニック結晶では、円柱状の誘電体を多数立設した構造のため、誘電体基板に孔を配列した構造に比べて機械的強度が低下するという問題点があった。

【0012】孔を配列した2次元フォトニック結晶の場合、結晶の厚み(蜂の巣格子2次元フォトニック結晶では円柱の高さに相当)は数 μm と、蜂の巣格子2次元フォトニック結晶の円柱直径の10倍程度にも及ぶ場合がある。それに関わらず、円柱間の領域は誘電率の最も小さい値、即ち誘電率1とするために空気で満たす必要があり、円柱を補強するための材料を埋めることが難しい。また、例え、補強のための材料を円柱間に充填できたとしても、フォトニック結晶の作製工程においては、誘電体基板を洗浄する際に洗浄水の表面張力のために円柱が破損する虞がある。

【0013】本発明は、上記の事情に鑑みてなされたものであって、完全バンドギャップを有し、かつ機械的強

度の大きい2次元構造のフォトニック結晶を提供することを目的とする。また、このフォトニック結晶を容易に、しかも量産し易い形で製造することができるフォトニック結晶の製造方法を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、本発明は次の様なフォトニック結晶及びその製造方法を採用した。すなわち、請求項1記載のフォトニック結晶は、2次元の蜂の巣格子状に配列された第1の誘電体からなる複数本の柱状体と、柱状体を被覆しかつ該柱状体間に充填された第2の誘電体と、該第2の誘電体中に内包される第3の誘電体とを備え、前記第1の誘電体の誘電率は、前記第2の誘電体の誘電率及び前記第3の誘電体の誘電率よりも大であることを特徴としている。このフォトニック結晶では、格子点の柱状体の間を誘電率の低い材料で接続することにより、2次元の蜂の巣格子状に配列された柱状体の広い完全バンドギャップと、三角格子状に配列された孔を有するフォトニック結晶の高い機械的強度を両立させることが可能になる。

【0015】請求項2記載のフォトニック結晶は、請求項1記載のフォトニック結晶において、前記第1の誘電体はSiまたはGaAsであり、前記第2の誘電体は SiO_2 、 SiN_3 または SiO_2N_3 であることを特徴としている。このフォトニック結晶では、前記第1の誘電体と前記第2の誘電体との間の密着性が高まり、フォトニック結晶の機械的強度が更に高まる。

【0016】請求項3記載のフォトニック結晶は、前記柱状体、前記第2の誘電体及び前記第3の誘電体を、均質媒質基板または多層構造基板に形成したことを特徴としている。このフォトニック結晶は、基板の低誘電率層と上部を覆う低誘電率の空気とにより挟まれた構成となるので、フォトニック結晶の外方、すなわち前記低誘電率層および/または空気への光の発散が抑制される。

【0017】請求項4記載のフォトニック結晶の製造方法は、第1の誘電体からなる柱状体が複数本、2次元の蜂の巣格子状に配列された基板上に、前記第1の誘電体より誘電率の小さい第2の誘電体からなる膜を成膜する工程を備え、この工程における前記膜の膜厚を、前記柱状体間で当該膜が連続する程度の膜厚とすることを特徴としている。このフォトニック結晶の製造方法では、完全バンドギャップを有し、かつ機械的強度の高いフォトニック結晶を製造することが可能になる。

【0018】請求項5記載のフォトニック結晶の製造方法は、誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体の大きさを制御することを特徴としている。このフォトニック結晶の製造方法では、酸化膜の厚みの制御を精密に行なうことができるので、直接、柱状体をエッチング加工する場合に比べ、加工の制御性に勝る。

【0019】請求項6記載のフォトニック結晶の製造方

法は、三角格子状に配列された誘電体孔を形成した基板を酸化する工程を備え、生成する酸化膜の厚みを、少なくとも前記誘電体孔の隣接する孔間が完全に酸化膜に変化するだけの厚みとすることを特徴としている。このフォトニック結晶の製造方法では、完全バンドギャップを有し、かつ機械的強度の高いフォトニック結晶を製造することが可能になる。しかも、製造工程中においても機械的強度を高く保つことが可能である。

【0020】請求項7記載のフォトニック結晶の製造方法は、請求項4、5または6記載のフォトニック結晶の製造方法において、前記基板はSi基板であることを特徴としている。このフォトニック結晶の製造方法では、成熟し、かつ技術的に安定しているSiの熱酸化技術を用いることが可能になる。

【0021】

【発明の実施の形態】本発明のフォトニック結晶及びその製造方法の各実施形態について図面に基づき説明する。

【第1の実施形態】図1は本発明の第1の実施形態のフォトニック結晶を示す平面図であり、2次元フォトニック結晶を周期平面の法線方向から見た平面構造を表している。

【0022】図において、符号1は断面が略三角形の誘電体柱（第1の誘電体からなる柱状体）、2は誘電体柱1の周囲を被覆しかつ該誘電体柱1間に充填された第2の誘電体、3は第2の誘電体2中に内包される円形状の第3の誘電体である。誘電体柱1は2次元の蜂の巣格子状に配列されており、誘電体柱1の周囲を誘電体2が覆っている。各誘電体柱1を覆う誘電体2は互いに繋がっており、誘電体柱1、1、…の間は誘電体2が充填された構造となっている。そのため、誘電体柱1は蜂の巣格子状に配列されているにも関わらず、従来の蜂の巣状に配列された円柱よりも機械的強度に優れている。

【0023】誘電体2は誘電体柱1、1、…の間に完全に充填されている訳ではなく、誘電体3を更に内包する。誘電体柱1、誘電体2、誘電体3の誘電率をそれぞれ ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 とすると、 $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 、 $\epsilon_1 > \epsilon_3$ の関係が成り立つ。誘電体柱1は三角形に近い形をしているが、必ずしも三角形である必要は無く、必要に応じて、或いは製造方法に応じて形が変わっても良い。誘電体柱1、誘電体2それぞれの形状についても同様に形の制限は無い。また、誘電体柱1、誘電体2、誘電体3の各材料については、 $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 、 $\epsilon_1 > \epsilon_3$ の関係を満たせばよく、特に材料の制限は無い。

【0024】この2次元のフォトニック結晶の構造上の長所は、三角格子配列孔構造の完全バンドギャップ以上の広さの完全バンドギャップが得られる柱の蜂の巣格子構造と、強度的に柱構造に勝る孔の三角格子構造を融合させた点である。

【0025】次に、本実施形態の具体例である実施例に

ついて説明する。誘電体柱1をSi（比誘電率11.9）の一辺約0.4 μm の三角柱とする。この誘電体柱1の周囲は、厚み0.1 μm のSiO₂（比誘電率3.1）が覆っている。誘電体3はこの場合、空気（比誘電率1）である。波長1.55 μm の光に対して完全バンドギャップを得るには、蜂の巣格子の格子定数を1.55 μm とすれば良い。蜂の巣格子の格子定数は誘電体3の配列周期に相当する。また、誘電体柱1がSiであるから、SiO₂を被覆することにより、例えば、GaAsにSiO₂を被覆する場合等と比べて密着性が高くなり、フォトニック結晶の機械的強度が高くなる。

【0026】【第2の実施形態】図2は本発明の第2の実施形態のフォトニック結晶を示す平面図であり、2次元フォトニック結晶を周期平面の法線方向から見た平面構造を表している。図において、符号11は断面が円形状の誘電体柱（第1の誘電体からなる柱状体）、12は誘電体柱1の周囲を被覆しかつ該誘電体柱11間に充填された第2の誘電体、13は第2の誘電体12中に内包される中空の円柱状の第3の誘電体である。

【0027】次に、本実施形態の具体例である実施例について説明する。誘電体柱11をGaAs（比誘電率13.1）の直径0.43 μm の円柱とし、その周囲を被う誘電体12を、厚み0.1 μm のSiO₂（比誘電率3.1）とする。また、誘電体13は空気（比誘電率1）である。波長1.55 μm の光に対して完全バンドギャップを得るには、蜂の巣格子の格子定数は1.55 μm とすればよい。蜂の巣格子の格子定数は誘電体13の配列周期に相当する。

【0028】【第3の実施形態】図3は本発明の第3の実施形態のフォトニック結晶の製造方法を示す過程図である。図中、A-1、B-1、C-1は各工程における断面図を、また、A-2、B-2、C-2は前記各工程に対応する平面図をそれぞれ示している。

【0029】このフォトニック結晶を製造するには、図中A-1及びA-2に示すように、まず、光リソグラフィ技術あるいは電子線直描技術を用いて蜂の巣格子のレジストパターンを誘電体基板21上に形成する。この場合、形成したパターンが抜きパターン、即ち格子点に穴のあるパターンであれば、金属あるいは誘電体の蒸着及びリフトオフを行ない、続くエッチング工程のためのエッチングマスク22を格子点に形成する。

【0030】また、レジストパターンが残しパターン、即ち格子点にレジストが残っているパターンであれば、このレジストを、続くエッチング工程のためのエッチングマスク22とする。また、レジストパターン形成に先立って誘電体基板21上に1層以上の金属あるいは誘電体の薄膜を成膜し、続いて残しパターンのレジストパターンを形成し、ウェットエッチングまたはドライエッチングによりレジストパターンを誘電体基板21上に成膜した前記薄膜に転写し、この薄膜転写パターンを続くエ

ッチング工程のためのエッチングマスク22とする。

【0031】レジストパターンから誘電体基板21上の前記薄膜へパターンを転写した後は、このレジストパターンを除去してもよく、しなくてもよい。レジストパターンを一度金属や誘電体に転写してから、更にその金属や誘電体の転写パターンをエッチングマスクとして基板に転写する手法は、基板とエッチングマスクの間のエッチング選択比を大きくするための手段としてよく用いられる。

【0032】次いで、図中B-1及びB-2に示すように、先に形成したエッチングマスク22のパターンを、ドライエッチング装置を用いて誘電体基板21に転写する。すなわち、この誘電体基板21の表面をエッチングし、この誘電体基板21に2次元の蜂の巣格子状の誘電体柱（誘電体からなる柱状体）23を形成する。ここで、エッチングマスク22が金属やレジストであれば、転写後、エッチングマスク22を除去する必要があるが、エッチングマスク22が誘電体材料である場合は、除去しても、残しておいても、いずれでもよい。

【0033】次いで、図中C-1及びC-2に示すように、加工した誘電体基板21を洗浄した後、この誘電体基板21の上に、該誘電体基板21よりも誘電率の小さい材料を用いて誘電体膜24を成膜する。この時の成膜厚みは、該誘電体基板21上に形成された蜂の巣格子配列の誘電体柱23の最近接誘電体柱23、23間で誘電体膜24が互いに接続する程度の厚さでなければならない。最近接誘電体柱23、23間で誘電体膜24が接続することにより、このフォトニック結晶の機械的強度が増加する。

【0034】次に、このフォトニック結晶の製造方法の具体例である実施例について説明する。誘電体基板21には誘電率13.1のGaAs基板（均質媒質基板）を用いる。この誘電体基板21による光の吸収を小さく抑えるため、この誘電体基板21はノンドープとする。次いで、スピンコーターを用いて該誘電体基板21上にPMMAレジストを0.2 μ m塗布し、80℃で15分間ベークした後、電子線描画装置を用いて描画、更に現像することにより、GaAs基板上に格子定数1.55 μ mの蜂の巣格子抜きレジストパターンを形成する。真空電子銃加熱蒸着装置を用いてレジストパターン上にNiを50nm堆積し、有機溶剤に該GaAs基板を浸漬して、レジスト上のNiをリフトオフする。

【0035】次いで、該GaAs基板をECRプラズマエッチング装置に導入し、0.1mTorrの塩素ガスプラズマを用いて、基板のバイアス電圧を70Vとしてエッチングを行う。このエッチング中、GaAs基板の温度が室温を維持するよう冷却する。エッチング完了後、塩酸処理と水洗によりGaAs基板上のNiマスクの除去と該GaAs基板の洗浄を行なう。次いで、熱CVD装置を用いて、該GaAs基板上に0.1 μ mのS

iO₂を堆積する。

【0036】更に、蜂の巣格子配列の誘電体柱23上部及び誘電体柱23、23間の底部に堆積されたSiO₂を除去したい場合には、更に該GaAs基板を平行平板型ドライエッチング装置に導入し、3mTorrのCF₄ガスプラズマを用いて、基板のバイアス電圧を30V程度とした異方性エッチングにより除去する。ここでは、ドライエッチング装置として、プラズマを利用する装置を用いたが、光を利用してエッチングする光エッチング装置を利用してもよく、異方性加工が行なえるものであれば、エッチング方法を特に限定する必要は無い。

【0037】本実施例により得られたフォトニック結晶は、GaAsの蜂の巣状に格子配列された誘電体柱23、23間はSiO₂により接続されているので、従来の円柱蜂の巣格子に比べて機械的強度は格段に向上している。

【0038】この第3の実施形態の2次元フォトニック結晶の製造方法では、誘電体（GaAs）の蜂の巣格子配列である誘電体柱は、製造工程途中において一時的に互いに分離されるので、製造工程途中での誘電体柱の破損といった懸念が残る。そこで、次に示す第4の実施形態のフォトニック結晶の製造方法は、このような製造工程途中における誘電体柱の破損の懸念を除去すると共に、製造容易にする更に優れた方法である。

【0039】〔第4の実施形態〕図4は本発明の第4の実施形態のフォトニック結晶の製造方法を示す過程図である。図中、A-1、B-1、C-1は各工程における断面図を、また、A-2、B-2、C-2は前記各工程に対応する平面図をそれぞれ示している。

【0040】このフォトニック結晶を製造するには、図中A-1及びA-2に示すように、先ず、光リソグラフィ技術を用いて、作製したい蜂の巣格子の格子定数と同じ格子定数を有する三角格子のレジストパターンを誘電体基板31上に形成する。この時、形成したパターンが残しパターン、即ち格子点にレジストが残っているパターンであれば、金属あるいは誘電体の蒸着とリフトオフを行ない、続くエッチング工程のためのエッチングマスク32を格子点以外の部分に形成する。

【0041】また、レジストパターンが抜きパターン、即ち格子点に穴のあるパターンであれば、そのレジストを、続くエッチング工程のためのエッチングマスク32とする。また、レジストパターン形成に先立って、誘電体基板31上に1層以上の金属あるいは誘電体の薄膜を成膜し、次いで、この薄膜上に抜きパターンのレジストパターンを形成し、ウェットエッチングまたはドライエッチングによりレジストパターンを誘電体基板31の上に成膜した前記薄膜に転写し、その薄膜転写パターンを続くエッチング工程のためのエッチングマスク32として用いる。

【0042】このレジストパターンから誘電体基板31

上の前記薄膜へのパターン転写を行った後は、レジストパターンを除去しても、あるいはしなくてもよい。次いで、図中B-1及びB-2に示すように、先に形成したエッチングマスク32のパターンを、ドライエッチング装置を用いて誘電体基板31に転写する。

【0043】すなわち、この誘電体基板31の表面をドライエッチングし、この誘電体基板31に2次元の三角格子配列孔33を形成する。ここでは、エッチングマスク32が金属やレジストであれば、転写後、エッチングマスク32を除去するが、エッチングマスク32が誘電体材料であれば、除去しても、あるいは残しておいても良い。

【0044】次いで、図中C-1及びC-2に示すように、加工した誘電体基板31を洗浄した後、この誘電体基板31を酸化し、三角格子配列孔33の表面の一定厚さを酸化膜34に変化させる。この酸化された部分は、酸化される前の材料である誘電体の高い誘電率から、酸化された後の酸化物の低い誘電率に変化することとなる。酸化膜34の厚みは、三角格子配列孔33の隣接する孔33、33間が完全に酸化膜34に変化するだけの厚み以上の厚みとすると、上述した第1の実施形態の図1の様に、誘電体材料は近接する3つの孔33に囲まれた領域にそれぞれ分断されて断面が略三角形の誘電体柱(第1の誘電体からなる柱状体)35となる。これらの位置関係は蜂の巣格子配列である。

【0045】最近接柱間で酸化膜34が接続しているので、結晶構造の機械的な強度は従来構造に比べて大きい。なお、酸化膜34の厚みは、三角格子配列孔33の隣接する孔33、33間が完全に酸化膜34に変化するだけの厚み以下でもよい。この場合は、孔33の三角格子配列を形成した後に酸化膜34を表面に堆積する場合と出来上がりは同じになるが、三角格子配列孔33、33間の誘電体材料の厚みが薄いフォトニック結晶を作製する場合には、先に三角格子配列孔33、33間の誘電体材料の厚みを大きくとって孔33の加工をした後に、表面から酸化していく方が精度的に余裕があり、製造が容易であるという利点がある。

【0046】次に、このフォトニック結晶の製造方法の具体例である実施例について説明する。誘電体基板31には、誘電率11.9のSi基板(均質媒質基板)を用いる。このSi基板による光の吸収を小さく抑えるため、Si基板はノンドープとする。次いで、スピコートを用いてSi基板上にi線用フォトリソを1 μ m塗布し、80℃で15分間ベークした後、i線ステッパーを用いて露光、更に現像することにより、Si基板上に格子定数1.55 μ m、穴径1.40 μ mの三角格子抜きレジストパターンを形成する。

【0047】次いで、このSi基板をECRエッチング装置に導入し、0.1mTorrの塩素ガスプラズマを用いて、Si基板のバイアス電圧を70Vとし、エッチ

ングを行う。エッチング中、Si基板の温度が室温を維持するよう冷却する。エッチング完了後、有機洗浄によりSi基板上的フォトリソを除去する。次いで、湿式熱酸化装置を用いて、Si基板表面の三角格子配列孔33の表面から0.1 μ mの深さまで酸化し、SiO₂とする。酸化温度は950℃である。

【0048】この時点で、図1の誘電体1の如く酸化されずに残ったSi柱は蜂の巣格子状に配列されていることになる。次いで、蜂の巣格子配列の誘電体柱35上部及び誘電体柱35、35間の底部に堆積されたSiO₂を除去したい場合は、更にSi基板を平行平板型ドライエッチング装置に導入し、3mTorrのCF₄ガスプラズマを用いて、Si基板のバイアス電圧を30V程度とした異方性エッチングにより除去する。勿論、強度的に問題が無ければ、SiO₂はフッ酸処理によって除去してもよい。

【0049】本実施形態からわかる様に、誘電体基板31を三角格子配列孔33から酸化することにより、誘電体材料を分断して蜂の巣状の格子配列の誘電体柱35とする製造方法によれば、機械的強度が増大するという利点以外に、最初に形成するレジストパターンの微細度が緩和されるという利点もある。

【0050】すなわち、波長1.55 μ mの光に対して完全バンドギャップを有する2次元フォトニック結晶を製造する場合、第3の実施形態では、格子定数1.55 μ mの蜂の巣格子のパターンニングを直接行うため、格子点の円柱中心の最近接距離は0.89 μ mとなり、g線やi線を用いるステッパーでの安定した解像は困難である。したがって、第3の実施形態では、より微細なパターンを形成することができる電子線描画装置を用いている。

【0051】しかしながら、この電子線描画装置はステッパーと比較してスループットが大幅に劣るという量産上の欠点がある。この点、本実施形態では、格子定数1.55 μ mの三角格子のパターンニングを行うため、格子点の円柱中心の最近接距離は1.55 μ mと大きく、g線やi線を用いるステッパーでの安定した解像が可能である。

【0052】誘電体基板31は、GaAs等のIII-V族化合物半導体基板やSi基板以外の他の誘電体材料を用いたものでもよいが、Si基板を用いた場合、成熟し、かつ技術的に安定しているSiの熱酸化技術を用いることができるという利点がある。誘電体基板31を表面からの酸化により細らせる方法は、酸化膜厚の制御を精密に行なうことができるため、直接、蜂の巣格子の微細な柱をエッチングにより加工する方法に比べて制御性に勝っている。この方法では、酸化する膜厚を変化させるだけで蜂の巣格子柱の大きさを変えることができ、PBGの存在する周波数領域の調整が酸化膜厚の調節だけで可能である。

【0053】[第5の実施形態]図5は本発明の第5の実施形態の多層構造基板に形成されたフォトニック結晶を示す断面図であり、図において、符号41は基板、42は低誘電率の誘電体材料からなる誘電体層、43は高誘電率の誘電体材料からなる2次元フォトニック結晶である。この構造は、例えば、多層構造基板としてSOI(Si on Insulator; Si/SiO₂/Si)基板を用い、高誘電率誘電体のSi部分に上述した第1または第2の実施形態の2次元フォトニック結晶を形成することで得られる。

【0054】この場合、2次元フォトニック結晶43は、低誘電率の誘電体層42と上部の低誘電率の空気に挟まれる構成となるので、いわゆるスラブ導波路に類似した構造となり、周期構造平面外、即ち、基板41の上下方向への光の発散が抑制されるという利点がある。

【0055】以上、本発明のフォトニック結晶及びその製造方法の各実施形態について図面に基づき説明してきたが、具体的な構成は本実施形態に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で設計の変更等が可能である。例えば、第1及び第2の実施形態のフォトニック結晶では、第3の誘電体3、13として空気を用いたが、この第3の誘電体3、13を空気以外の低誘電率の誘電体で充填した構成としても勿論よい。

【0056】

【発明の効果】以上説明した様に、本発明の請求項1記載のフォトニック結晶によれば、2次元の蜂の巣格子状に配列された第1の誘電体からなる複数本の柱状体と、柱状体を被覆しかつ該柱状体間に充填された第2の誘電体と、該第2の誘電体中に内包される第3の誘電体とを備え、前記第1の誘電体の誘電率は、前記第2の誘電体の誘電率及び前記第3の誘電体の誘電率よりも大としたので、2次元の蜂の巣格子状に配列された柱状体の広い完全バンドギャップと、三角格子状に配列された孔を有するフォトニック結晶の高い機械的強度の両立を実現することができる。

【0057】請求項2記載のフォトニック結晶によれば、前記第1の誘電体をSiまたはGaAsとし、前記第2の誘電体をSiO₂、SiN_xまたはSiO_xN_yとしたので、前記第1の誘電体と前記第2の誘電体との間の密着性を高めることができ、フォトニック結晶の機械的強度を更に高めることができる。

【0058】請求項3記載のフォトニック結晶によれば、前記柱状体、前記第2の誘電体及び前記第3の誘電体を、均質媒質基板または多層構造基板に形成したので、このフォトニック結晶は、基板の低誘電率層と上部を覆う低誘電率の空気とにより挟まれる構成となり、フォトニック結晶の外方、すなわち前記低誘電率層および/または空気への光の発散を抑制することができる。

【0059】請求項4記載のフォトニック結晶の製造方法によれば、第1の誘電体からなる柱状体が複数本、2

次元の蜂の巣格子状に配列された基板上に、前記第1の誘電体より誘電率の小さい第2の誘電体からなる膜を成膜する工程を有し、この工程における前記膜の膜厚を、前記柱状体間で当該膜が連続する程度の膜厚とするので、完全バンドギャップを有し、かつ機械的強度の高いフォトニック結晶を得ることができる。

【0060】請求項5記載のフォトニック結晶の製造方法によれば、誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体の大きさを制御するので、酸化膜の厚みの制御を精密に行なうことができ、直接、柱状体をエッチング加工する場合に比べ、加工の制御性を向上させることができる。

【0061】請求項6記載のフォトニック結晶の製造方法によれば、三角格子状に配列された誘電体孔を形成した基板を酸化する工程を有し、生成する酸化膜の厚みを、少なくとも前記誘電体孔の隣接する孔間が完全に酸化膜に変化するだけの厚みとするので、完全バンドギャップを有し、かつ機械的強度の高いフォトニック結晶を得ることができる。しかも、製造後のみならず製造工程中においても、機械的強度を高く保つことができ、かつパターンニング工程におけるパターンの微細度を緩和することができる。

【0062】請求項7記載のフォトニック結晶の製造方法によれば、前記基板をSi基板としたので、成熟し、かつ技術的に安定しているSiの熱酸化技術を用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1の実施形態のフォトニック結晶を示す平面図である。

【図2】 本発明の第2の実施形態のフォトニック結晶を示す平面図である。

【図3】 本発明の第3の実施形態のフォトニック結晶の製造方法を示す過程図である。

【図4】 本発明の第4の実施形態のフォトニック結晶の製造方法を示す過程図である。

【図5】 本発明の第5の実施形態の多層構造基板に形成されたフォトニック結晶を示す断面図である。

【図6】 三角格子配列孔の2次元フォトニック結晶のPBG生成条件を説明するための周波数と半径との関係を示す特性図である。

【図7】 蜂の巣格子配列の2次元フォトニック結晶のPBG生成条件を説明するための周波数と半径との関係を示す特性図である。

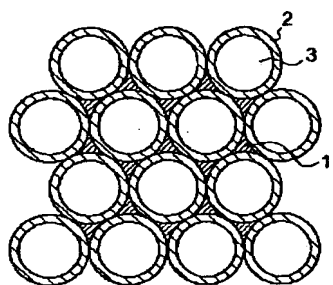
【符号の説明】

- 1 誘電体柱
- 2 第2の誘電体
- 3 第3の誘電体
- 11 誘電体柱
- 12 第2の誘電体
- 13 第3の誘電体

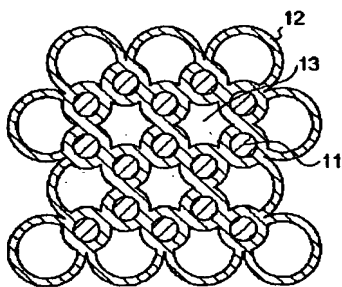
- 21 誘電体基板
22 エッチングマスク
23 誘電体柱
24 誘電体膜
31 誘電体基板
32 エッチングマスク

- 33 三角格子配列孔
34 酸化膜
35 誘電体柱
41 基板
42 誘電体層
43 2次元フォトニック結晶

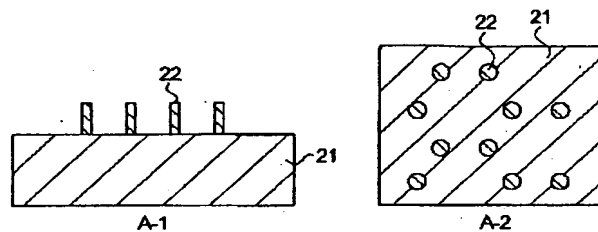
【図1】



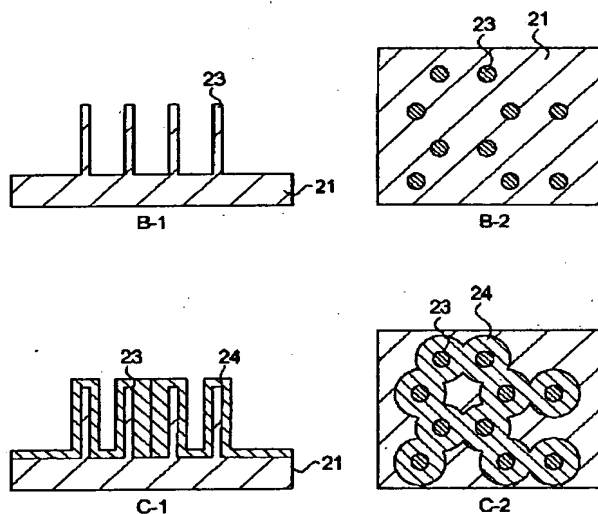
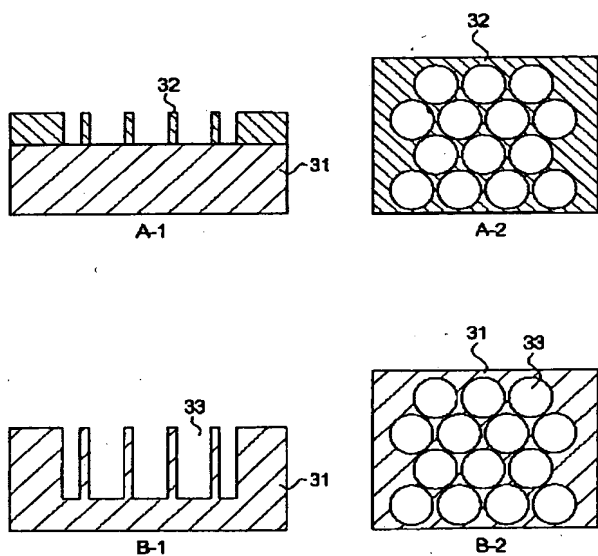
【図2】



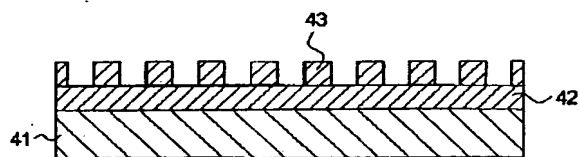
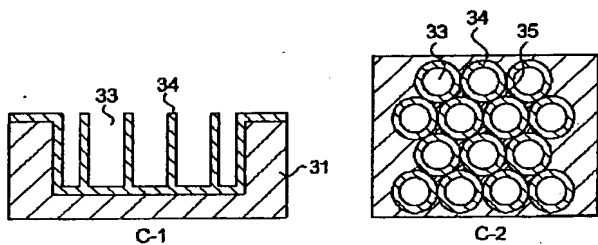
【図3】



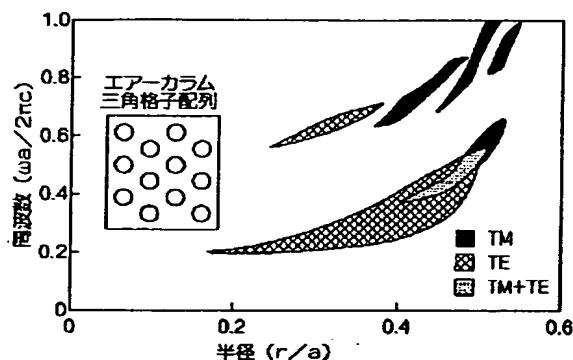
【図4】



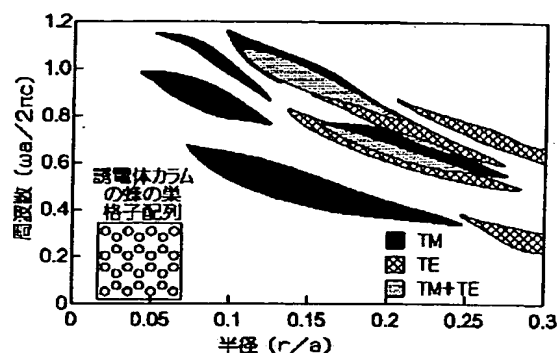
【図5】



【図6】



【図7】



【手続補正書】

【提出日】平成11年10月25日(1999.10.25)

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】特許請求の範囲

【補正方法】変更

【補正内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】 2次元の蜂の巣格子状に配列された第1の誘電体からなる複数本の柱状体と、柱状体を被覆しかつ該柱状体間に充填された第2の誘電体と、該第2の誘電体中に内包される第3の誘電体とを備え、前記第1の誘電体の誘電率は、前記第2の誘電体の誘電率及び前記第3の誘電体の誘電率よりも大であることを特徴とするフォトニック結晶。

【請求項2】 前記第1の誘電体はSiまたはGaAsであり、前記第2の誘電体はSiO₂、SiN_xまたはSiO_xN_yであることを特徴とする請求項1記載のフォトニック結晶。

【請求項3】 前記柱状体、前記第2の誘電体及び前記第3の誘電体を、均質媒質基板または多層構造基板に形成してなることを特徴とする請求項1または2記載のフォトニック結晶。

【請求項4】 第1の誘電体からなる柱状体が複数本、2次元の蜂の巣格子状に配列された基板上に、前記第1の誘電体より誘電率の小さい第2の誘電体からなる膜を成膜する工程を備え、この工程における前記膜の膜厚を、前記柱状体間で当該膜が連続する程度の膜厚とすることを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

【請求項5】 誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体、または誘電体孔の大きさを制御することを特徴とするフォトニック

結晶の製造方法。

【請求項6】 三角格子状に配列された誘電体孔を形成した基板を酸化する工程を備え、生成する酸化膜の厚みを、少なくとも前記誘電体孔の隣接する孔間が完全に酸化膜に変化するだけの厚みとすることを特徴とするフォトニック結晶の製造方法。

【請求項7】 前記基板は、Si基板であることを特徴とする請求項4、5または6記載のフォトニック結晶の製造方法。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0018

【補正方法】変更

【補正内容】

【0018】請求項5記載のフォトニック結晶の製造方法は、誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体、または誘電体孔の大きさを制御することを特徴としている。このフォトニック結晶の製造方法では、酸化膜の厚みの制御を精密に行なうことができるので、直接、柱状体、または孔をエッチング加工する場合に比べ、加工の制御性に勝る。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0060

【補正方法】変更

【補正内容】

【0060】請求項5記載のフォトニック結晶の製造方法によれば、誘電体基板の表面を酸化し、生成する酸化膜の厚みにより、誘電体からなる柱状体、または誘電体孔の大きさを制御するので、酸化膜の厚みの制御を精密に行なうことができ、直接、柱状体、または孔をエッチング加工する場合に比べ、加工の制御性を向上させることができる。

THIS PAGE BLANK (USPTO)